

ジェットエンジンのコンプレッサーのブレードデザイン

村野 太紀

洛星高等学校 2年

1. 動機・目的

僕は、機械工学に興味があり、ジェットエンジンの構造を知りたかったので、このプロジェクトを選択することにした。

このプロジェクトは、ジェットエンジンに用いられているコンプレッサーのブレードのエネルギー効率をいかにしてよくするか、を研究するものである。

この研究が進めば、エネルギー効率が良くなり、必要なエネルギー量が少なくなる。また、必要なブレードの枚数が少なくなるので、機体の軽量化にもつながる。したがって、使用する燃料が少なくなる。

環境問題の視点から考えても、非常に有益な研究である。

2. 手順

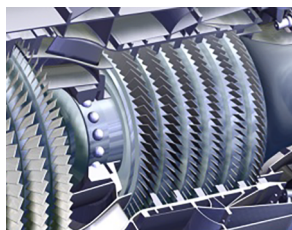
まず初めに、コンプレッサーとは何か、また、流体力学の基礎知識を教わった。次に、コンプレッサーのブレードを設計及び試作した。試作したブレードを用いて、風洞実験を行った。

3. 理論

I コンプレッサーとは

ジェットエンジンは、ファンから取り入れた空気を高圧にして、高エネルギー状態にしてから着火させて、それを勢いよく噴射させることによって、推進力を得る。この空気を高圧にするための装置がコンプレッサーである。

コンプレッサーは、多数のブレードを高速で回転させることにより、空気を圧縮する。ブレードが適切でない形状をしていると、航跡波が生じ、エネルギー効率が下がってしまう。それゆえに、ブレードの形状を改善してエネルギー効率を向上することが、このプロジェクトの主な目的である。

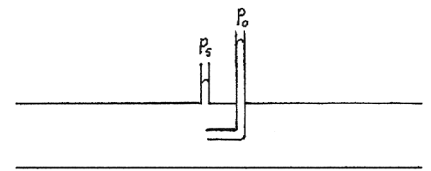


II 静圧とよどみ点圧～ベルヌーイの等式～

圧力には2種類の定義の仕方があり、それぞれ、静圧 (Static Pressure) とよどみ点圧 (Stagnation Pressure) と呼ばれる。

静圧は、流れている空気のある一点における圧力であり、壁に穴をあけて、その穴へ入ってくる空気の圧力として測定する。

よどみ点圧は、速度を持った流れが静止した時の圧力であり、流れに対して平行に設置



されたセンサーを用いて測定する。

静圧を P_s 、よどみ点圧を P_0 と表すと、以下の等式が成立する。(ベルヌーイの等式)

$$P_0 - P_s = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\rho \text{ は粘性度, } V \text{ は速度})$$

この式を変形すると、 V を P_0 と P_s を用いて表すことができる。

$$V = \sqrt{\frac{P_0 - P_s}{\frac{1}{2}\rho}}$$

III 連続方程式

右の図において、一般に、次の等式が成り立つ。

ただし、 A_1 、 A_2 はそれぞれ流入口の面積、 V_1 、 V_2 はそれぞれ流入口における空気の速さである。



$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

基本的に、流入する空気と流出する空気の粘性度は同じであるので、 $\rho = (\text{一定})$ として

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

これは、もし A_1 が A_2 よりも大きかったら、 V_2 が V_1 よりも大きくなり、 A_2 が A_1 よりも大きかったら、 V_1 が V_2 よりも大きくなることを示している。

ここで、よどみ点圧 P_0 が一定であるとする。前項における、ベルヌーイの式を変形した式により、 V_1 のほうが大きい状態では、 P_s が上昇し、 V_2 が大きい状態では、 P_s が下降することになる。

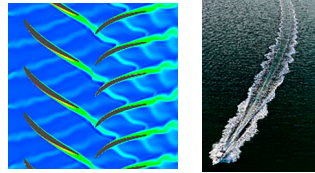
P_0 が一定という条件下で、ベルヌーイの式は以下のように書き換えられる。

$$\rho s_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = \rho s_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = (\text{一定})$$

IV 航跡波と、気体分子の運動エネルギーの損失割合 (損失係数)

空気の経路中に、障害物があると、その空気は運動エネルギーを失う。これは航跡波 (wake) ができるためである。

この時に失われた気体分子全体の運動エネルギーの割合は次のようにあらわされる。



$$Y_p = \frac{KE_{2,ideal} - KE_{2,real}}{KE_1}$$

$$Y_p = \frac{\frac{1}{2}mV_{2,ideal}^2 - \frac{1}{2}mV_{2,real}^2}{\frac{1}{2}mV_1^2}$$

$$Y_p = \frac{V_{2,ideal}^2 - V_{2,real}^2}{V_1^2}$$

先程のベルヌーイの式を変形したものを使うと、失われた運動エネルギーの割合を、速度を用いずに計算することができる。

$$V^2 = \frac{2(P_0 - P_s)}{\rho}$$

$$Y_p = \frac{V_{2,ideal}^2 - V_{2,real}^2}{V_1^2}$$

$$Y_p = \frac{(P_{02,ideal} - P_{s2}) - (P_{02} - P_{s2})}{(P_{01} - P_{s1})}$$

$$Y_p = \frac{(P_{01} - P_{s2}) - (P_{02} - P_{s2})}{(P_{01} - P_{s1})}$$

$$Y_p = \frac{P_{01} - P_{02}}{P_{01} - P_{s1}}$$

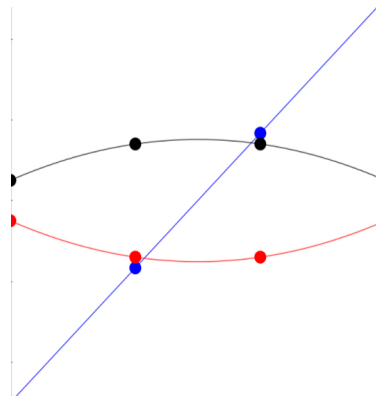
後に記述する通り、実験では、圧力を測って、測った圧力から損失係数を算出している。

4. ブレードのデザイン

mis flow solver というプログラムを使って、コンプレッサのブレードをデザインする。これは、側方から見たブレードの裏面、表面に相当する曲線を調整し、その調整されたブレードに風を流して、損失係数を求めるシミュレーションをするプログラムである。

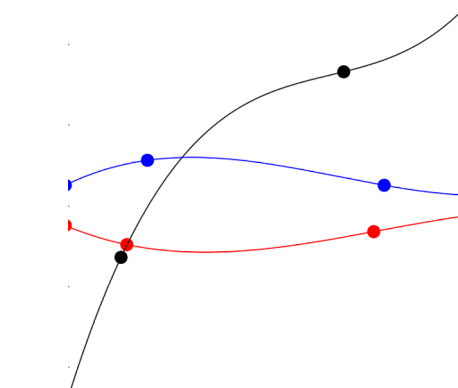
以下の図におけるデザイン1は、調整開始時のブレード形状であり、デザイン117は、最終的に選定したブレード形状である。

デザイン1



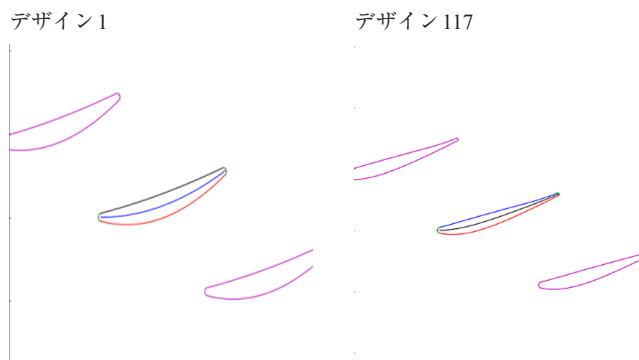
Compressor Cascade			
Mach ₁ = 0.1285	Mach ₂ = 0.0841		
p ₁ /p ₀ = 0.9885	p ₂ /p ₀ = 0.9943		
S ₁ = -1.8572	S ₂ = -0.9601		
p ₂ /p ₁ = 1.0059	Re = 0.134×10 ⁶		
ω = 0.0664	ω _v = 0.0689		

デザイン117



Compressor Cascade			
Mach ₁ = 0.1285	Mach ₂ = 0.0841		
p ₁ /p ₀ = 0.9885	p ₂ /p ₀ = 0.9946		
S ₁ = -1.8572	S ₂ = -0.9630		
p ₂ /p ₁ = 1.0061	Re = 0.136×10 ⁶		
ω = 0.0414	ω _v = 0.0423		

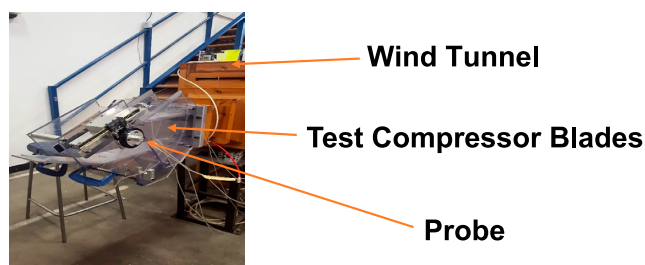
ωが損失係数 (気体分子の運動エネルギーが失われた割合) で、デザイン117の方が、ωの値が小さくなっている。これにより、デザインが改良されて、より効率の良いブレードができたことが分かる。



デザイン117は、デザイン1と比べると、全体的に薄くなっており、特に空気流れの下流側において顕著に薄くなっているのが見てわかる。

5. 実験

選定したデザイン117のブレードの模型を3Dプリンターで作成する。

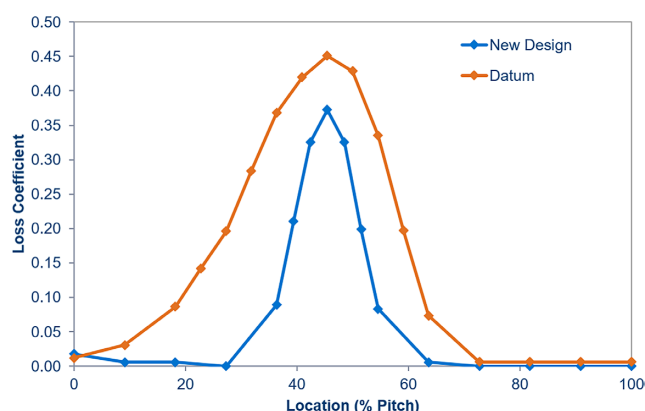


模型に風を当てて、静圧とよどみ点圧をセンサーで測る。空気の流れを可視化するために、模型に蛍光塗料を塗り、そしてその蛍光塗料がどの位置まで飛んでいるかを確認する。遠くまで飛んでいるほど、良いことになる。

また、塗料が溜まっていれば、そこに航跡波ができた、ということもわかる。



ブレードの角度を変えることでブレードにあたる風の向きを変え、各角度における損失係数を算出する。



実験結果をまとめたものが上のグラフである。横軸がブレードの角度であり、縦軸が損失係数である。赤の線がデザイン1での結果、青の線がデザイン117での結果である。

デザイン117では、いずれの角度でも、デザイン1と比較して損失係数が激減しているのが分かる。

6. 考察

- ・今回のブレードの試作は、3Dプリンターも正常に作動し、うまくいったと思う。
- ・ブレードの形状を調整することにより、損失係数が低く、エネルギー効率が良いブレードを見出すことができた。
- ・実際使われているブレードは、ただブレードの形だけを変えるのではなく、穴をあけたりするなどの工夫がされている。これは、空気を通してブレードを冷やすためであると考えられる。
- ・コンプレッサーのブレードは、飛行機の翼に形は似ていると思う。空気に密接に関わっているからなのではないか。
- ・ブレードの改良方法は、今回行った角度や薄さなどのブレードの形状の調整のほかにも、ブレードの材質、大きさ、回転数等にも影響されるので、様々な角度からのアプローチが必要である。
- ・飛行機のジェットエンジンを作るために、本当にたくさんの人が研究を重ねていることが分かった。
- ・3Dプリンターで作った樹脂製のブレードと、実際に使われているチタン製のブレードとの対照実験にも関心がある。